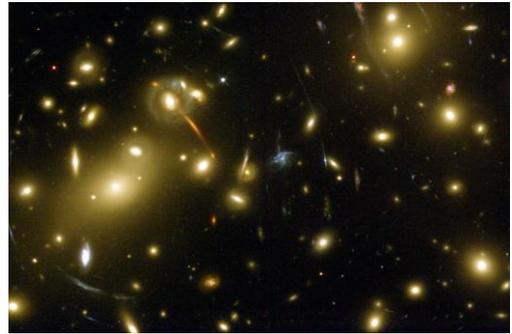


# Aula 24: Aglomerados de Galáxias e Lei de Hubble

Maria de Fátima Oliveira Saraiva, Kepler de Souza Oliveira Saraiva & Alexei Machado Müller



Abell 2218 é um aglomerado rico de galáxias localizado a uma distância de 2 bilhões de anos-luz, na constelação do Dragão. O aglomerado é tão massivo que sua gravidade concentra e desvia a luz de galáxias que estão atrás dele, formando imagens múltiplas e distorcidas delas - os arcos visíveis na imagem. Esse fenômeno é chamado lente gravitacional. Crédito: [NASA/ESA](#)

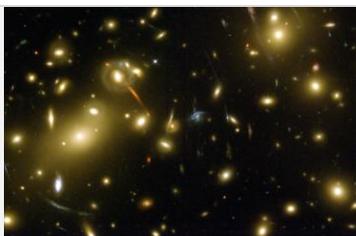
## Introdução

As galáxias raramente são encontradas isoladas, a maioria delas faz parte de uma “comunidade” – os aglomerados de galáxias - que pode ter menos de uma dezena ou milhares de membros. Interações são comuns entre as galáxias de um aglomerado, e essas interações ajudam a “moldar” as formas das galáxias.

Os aglomerados de galáxias pertencem a associações ainda maiores: os superaglomerados – aglomerados de aglomerados de galáxias-, que constituem as maiores estruturas do universo. Os aglomerados de galáxias têm diâmetros de dezenas de milhões de anos luz, e os superaglomerados têm diâmetros dez vezes maiores. Para medir distâncias e tamanhos nessa escala de grandeza o único recurso que temos é a própria expansão do universo: a lei de Hubble.

Esses são os assuntos da aula de hoje.

Bom estudo!



## Objetivos

- Saber que as galáxias se distribuem em aglomerados e os aglomerados em superaglomerados;
- Localizar a Via Láctea na estrutura em grande escala do Universo;
- Discutir o efeito de interações na evolução das galáxias;
- Escrever a Lei de Hubble e explicar como ela pode ser usada para determinar distâncias a objetos remotos.

## A Via Láctea é grande ou pequena comparada com as outras galáxias de seu grupo?

### Aglomerados de galáxias

As galáxias não estão distribuídas uniformemente no espaço, mas tendem a se concentrar em aglomerados, nos quais todas se encontram ligadas gravitacionalmente.

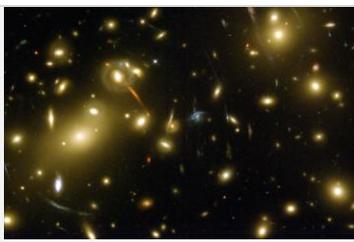
Existem aglomerados pobres, com poucas dezenas de membros, e aglomerados ricos, que chegam a ter milhões de membros. Os aglomerados pobres costumam ser chamados *grupos*. A nossa própria galáxia, a Via Láctea, faz parte de um grupo de galáxias chamado Grupo Local, que contém cerca de 50 membros. Já o aglomerado de Virgem é muito mais rico, contendo 2.500 galáxias.

#### Aglomerados:

Galáxias tendem a se agrupar em aglomerados. Aglomerados tendem a se juntar formando superaglomerados.



Figura 24.01: Fotografia de parte do aglomerado de Virgem, obtida por David Malin com o UK Schmidt Telescope do Anglo-Australian Telescope. O aglomerado contém mais de 2 500 galáxias e cobre mais de 5° no céu. As duas grandes galáxias elípticas que aparecem na imagem são M84 (logo acima do centro) e M86 (à direita do centro).



### Grupo Local:

Constituído por cerca de 50 galáxias, das quais a Via Láctea e Andrômeda são as duas maiores.

O diâmetro maior do Grupo Local é de  $3 \times 10^6$  al, pouco maior do que a distância entre Via Láctea e Andrômeda.

Os aglomerados ricos tendem a apresentar forma mais esférica e compacta, ao passo que os aglomerados pobres são irregulares e esparsos. Em geral os aglomerados contêm mais galáxias anãs de baixa luminosidade do que galáxias massivas, mas aglomerados ricos podem ter até mais de 300 galáxias luminosas e massas totais que ultrapassam  $10^{15} M_{\text{sol}}$ .

## O Grupo Local

O Grupo Local de galáxias, do qual faz parte a nossa galáxia, é um aglomerado pequeno, com cerca de 50 membros, que ocupa um volume de 3 milhões de anos-luz na sua dimensão maior. A Via Láctea e Andrômeda (M31) são de longe os dois membros mais massivos, estando um em cada borda do aglomerado. A terceira galáxia mais luminosa do grupo é outra espiral, M33, que tem 20% da luminosidade da Via Láctea e 13% da luminosidade de Andrômeda. Entre os demais membros existem duas elípticas, M32, satélite de M31, e M110, e várias irregulares e galáxias anãs.

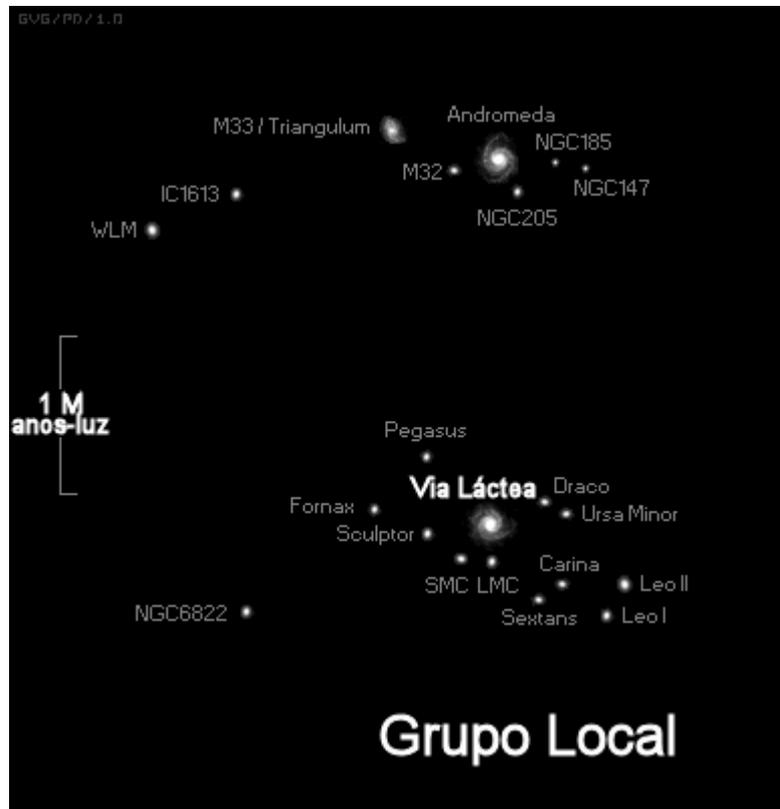
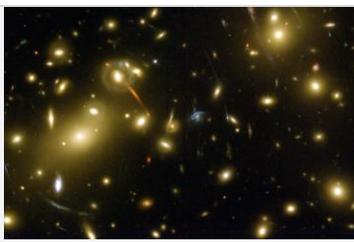


Figura 24.02: Diagrama mostrando as galáxias que fazem parte do Grupo Local. A Via Láctea e Andrômeda são os dois maiores membros. A escala da imagem está indicada à esquerda (1 Mano-luz = 1 mega-ano-luz = 1 milhão de anos luz).

As Nuvens de Magalhães (Grande Nuvem de Magalhães e Pequena Nuvem de Magalhães), galáxias irregulares satélites da nossa Galáxia, também fazem parte desse grupo. A Grande Nuvem de Magalhães, localizada a 150 mil anos-luz (46 kpc) da Via Láctea, era até 1994 considerada a galáxia mais próxima<sup>2</sup>. Desde 2003 foram descobertas várias galáxias anãs na região do Grupo Local, entre as quais uma anã localizada a apenas 25 mil anos-luz de distância, na direção do centro galáctico. Essa é atualmente a galáxia mais próxima, e só não foi detectada antes devido a estar numa região de grande extinção e ter brilho superficial muito baixo.



No total, o grupo local contém pelo menos 3 galáxias espirais, 2 elípticas, 15 galáxias irregulares de diferentes tamanhos, e 17 anãs elípticas. A maioria das galáxias se encontra orbitando a Via Láctea ou Andrômeda, dando uma aparência binária ao Grupo Local.

### Outros aglomerados de galáxias

Outros aglomerados de galáxias variam de grupos pequenos a aglomerados ricos. O aglomerado de **Fornax**, relativamente próximo, apresenta um conjunto variado de tipos de galáxias, embora tenha poucos membros.

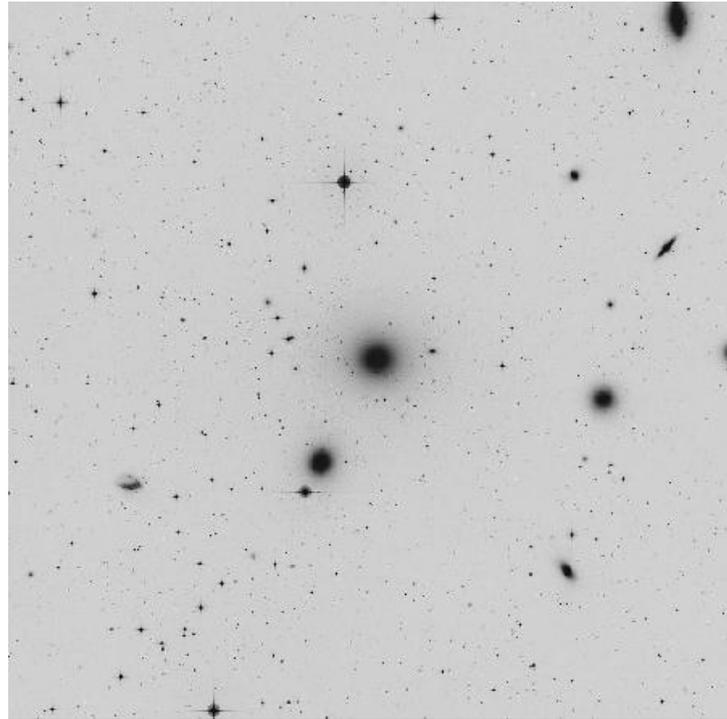


Figura 24.03: Imagem do centro do aglomerado de galáxias do Fornax, a 15 Mpc de distância. No centro está a galáxia elíptica tipo E1 NGC 1399 . Abaixo desta está a NGC 1404, também classificada como E1, e à esquerda desta a irregular NGC 1427.

#### Aglomerado de Virgem:

É o aglomerado rico mais próximo do Grupo Local, contendo mais de 2.000 membros. Interage gravitacionalmente com as galáxias do Grupo Local.

O aglomerado de **Virgem**, a uma distância de cerca de 50 milhões de anos-luz de nós, cobre 20 milhões de anos-luz no espaço e é um dos mais espetaculares do céu. Suas quatro galáxias mais brilhantes são galáxias elípticas gigantes, embora a maior parte das galáxias membros visíveis sejam espirais. O aglomerado de Virgem é tão massivo e tão próximo que influencia gravitacionalmente o Grupo Local, fazendo com que nos movamos na sua direção. A galáxia elíptica gigante M87, a maior do aglomerado, contém um buraco-negro massivo em seu centro, com massa de  $1,3 \times 10^9$  massas solares.

O grande aglomerado de **Coma** cobre 20 milhões de anos-luz no espaço (2 graus de diâmetro) e contém milhares de membros.

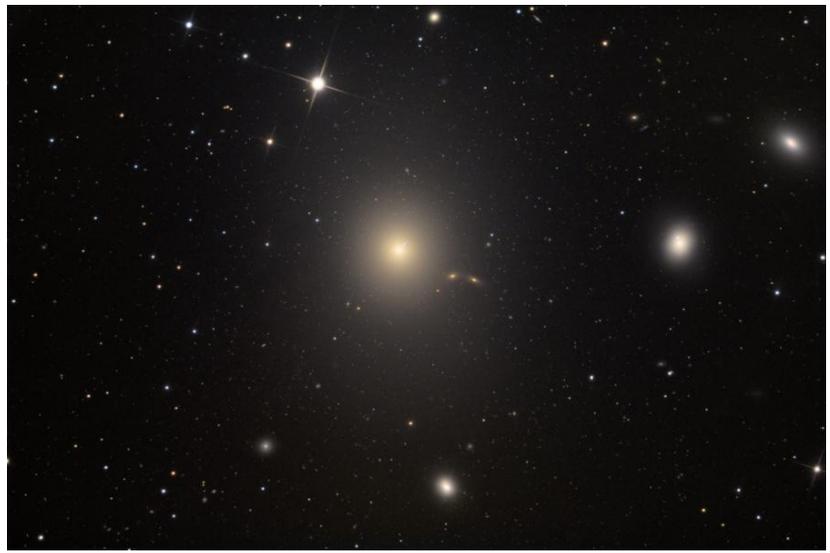
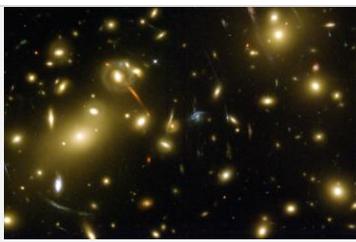


Figura 24.04: Foto de parte do aglomerado de Virgem, tendo a galáxia elíptica M87, no centro da imagem. A galáxia está localizada a 50 milhões de anos-luz da Terra. Crédito: [APOD/NASA](#).



Figura 24.05: Parte central da galáxia elíptica gigante M87, fotografada pelo Hubble Space Telescope. A galáxia está muito distante mesmo para o telescópio espacial detectar estrelas individuais. As formas pontuais são aglomerados estelares. O jato de elétrons relativísticos é acelerado pelo buraco negro massivo central.

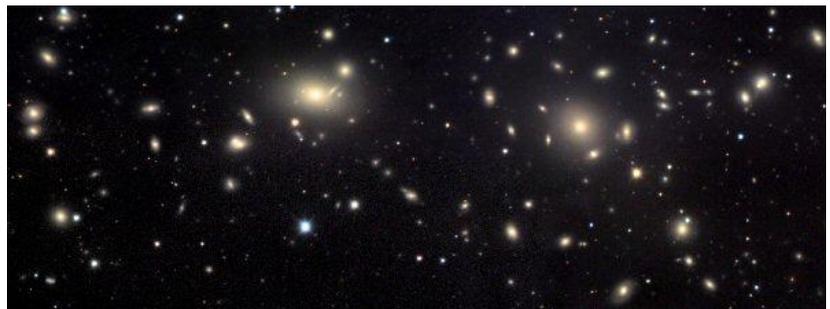
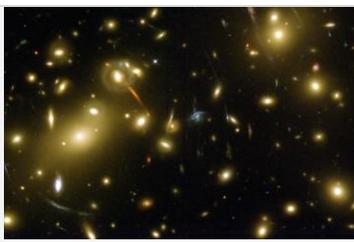


Figura 24.06: Aglomerado de Coma, quase todo objeto visto nesta foto é uma galáxia do aglomerado.

### Matéria escura em aglomerados

As massas dos aglomerados podem ser calculadas de maneira análoga a como se calcula as massas de galáxias elípticas, ou seja, medindo a velocidade média das galáxias do aglomerado. Essas velocidades levam a valores de massa que são de 10 a 100 vezes maiores do que os valores esperados considerando apenas a luz total emitida pelas galáxias individuais do aglomerado, ou seja, a matéria escura deve ser dominante nos aglomerados.



Meio Intergaláctico:

Permeia o espaço entre as galáxias. Contém gás quente, com temperaturas de dezenas de milhões de kelvins, que emite raios-X. Além do gás quente, o meio intergaláctico contém a desconhecida matéria escura.

#### Superaglomerado Local:

Formado pelo Grupo Local, pelo aglomerado de Virgem e outros aglomerados próximos.

Atualmente se sabe que o meio intergaláctico contém um gás quente, com temperaturas da ordem de  $10^7$  K, o qual foi detectado por sua emissão em raios-X, por satélites. Esse gás quente e extremamente rarefeito (1 átomo por quilômetro cúbico) pode constituir parte da matéria originalmente chamada de escura.

Uma maneira de mapear a matéria escura em aglomerados de galáxias é através de seu efeito de lente gravitacional. A massa do aglomerado deforma o espaço, concentrando a luz de galáxias mais distantes, que aparecem como imagens múltiplas e distorcidas sobre a imagem do aglomerado.



Figura 24.07: Lentes gravitacionais no cúmulo Abell 2218, fotografado pelo Telescópio Espacial Hubble.

### Superaglomerados

Depois de descobrir que as galáxias faziam partes de aglomerados de galáxias, os astrônomos se perguntaram se existiam estruturas ainda maiores no Universo. Em 1953, o astrônomo francês **Gérard de Vaucouleurs** (1918-1995) demonstrou que os aglomerados de galáxias também formam superaglomerados.

O superaglomerado mais bem estudado é o Superaglomerado Local, porque fazemos parte dele. Ele tem um diâmetro de aproximadamente 100 milhões de anos-luz e uma massa de aproximadamente  $10^{15}$  massas solares, contendo o Grupo Local de galáxias, e o aglomerado de Virgem.

### Estrutura em Grande Escala

Entre estes superaglomerados observam-se grandes regiões sem galáxias, mas onde foram detectadas nuvens de hidrogênio neutro. Os superaglomerados se distribuem em enormes cadeias como se fossem filamentos de uma grande estrutura. Um exemplo destes filamentos é a Grande Parede (*Great Wall*), um concentração de galáxias que se estende por cerca de 500 milhões de anos-luz de comprimento, 200 milhões de anos-luz de altura, mas somente 15 milhões de anos-luz de espessura. Esta estrutura está a uma distância média de 250 milhões de anos-luz da nossa Galáxia, e tem uma massa da ordem de  $2 \times 10^6 M_{\odot}$ . Entre estes filamentos estão regiões, de diâmetros de 150 milhões de anos-luz, sem galáxias. A estrutura lembra uma esponja.

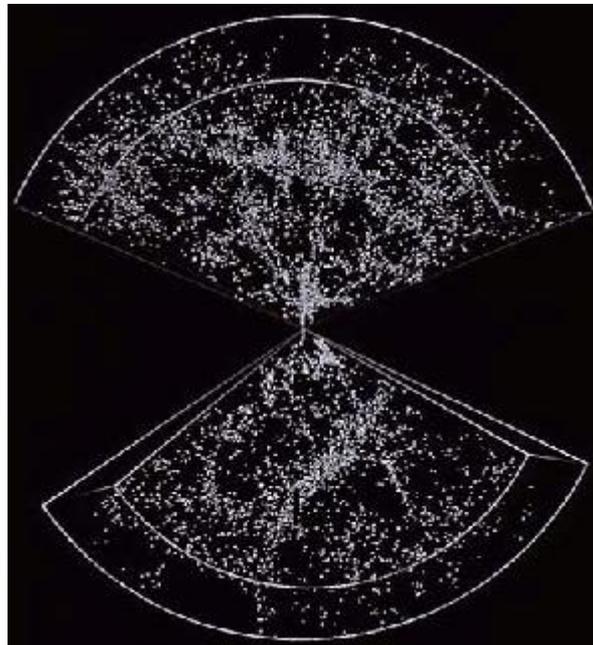
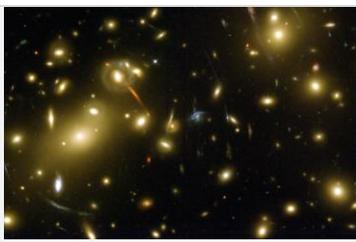


Figura 24.08: Distribuição de galáxias no espaço, conforme observações de Margaret Geller e John Huchra. Cada ponto nesta figura representa uma das 9325 galáxias, na direção do polos sul e norte da Galáxia. Nossa galáxia está no centro da figura, onde as duas partes se unem; as regiões não mapeadas são obscurecidas pelo disco da Galáxia. A Grande Parede é a banda de galáxias que se estende de lado a lado quase no meio da parte superior da figura.

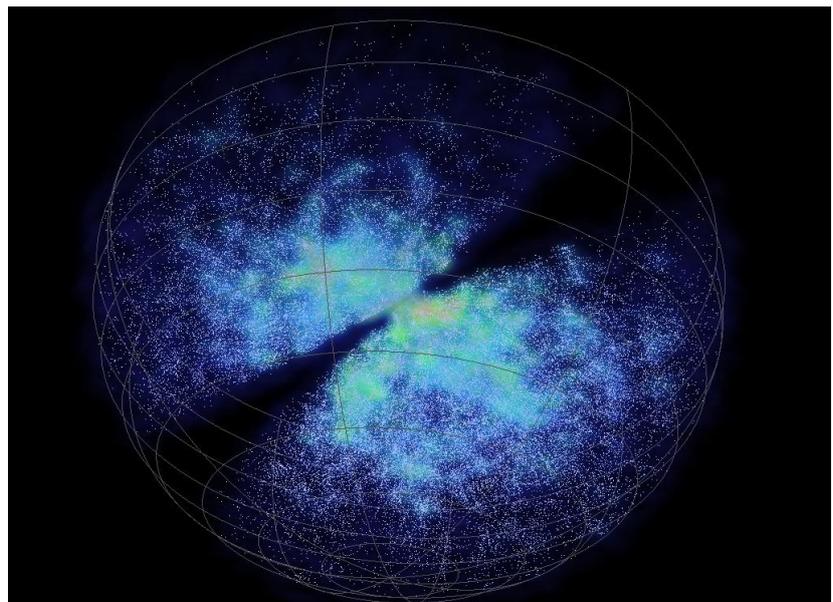


Figura 24.09: Distribuição espacial de 100 mil galáxias próximas determinada pelo survey de galáxias 6DFGS, na Austrália. Cada galáxia é representada por um ponto. Nossa galáxia está no centro da distribuição e a faixa onde não foram observadas galáxias indica o disco da Via Láctea. Crédito: Dr Chris Fluke, Centre for Astrophysics and Supercomputing, Swinburne University of Technology.

## Colisões entre galáxias

Galáxias em aglomerados estão relativamente próximas umas das outras, isto é, as separações entre elas não são grandes comparadas com seus tamanhos (**o espaçamento entre as galáxias é da ordem de apenas cem vezes o seu tamanho**, enquanto a distância média entre as estrelas é da ordem de 1 parsec = 22 milhões de diâmetros solares). Isso significa que provavelmente essas galáxias estão em frequentes interações umas com as outras.

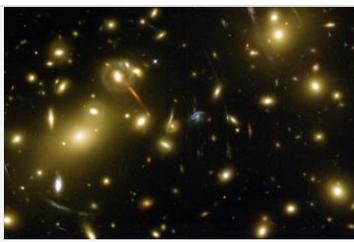


Figura 24.10: Imagem do Telescópio Espacial Hubble da galáxia do girino (*tadpole*).

Nos catálogos existentes de galáxias peculiares há muitos exemplos de pares de galáxias com aparências estranhas que parecem estar interagindo uma com a outra. Podemos entender muitos desses casos em termos de **efeitos de maré gravitacional**.

É de se esperar que uma interação de maré entre duas galáxias puxe matéria de uma em direção à outra. Essas "pontes" de matéria realmente se formam entre as galáxias interagentes, mas também se formam caudas de matéria que saem de cada galáxia na direção oposta à outra. Devido à rotação das galáxias, as caudas e pontes podem assumir formas esquisitas, especialmente se levarmos em conta o fato de que os movimentos orbitais das galáxias estarão em um plano que forma um ângulo qualquer com a nossa linha de visada.

#### Colisões entre galáxias:

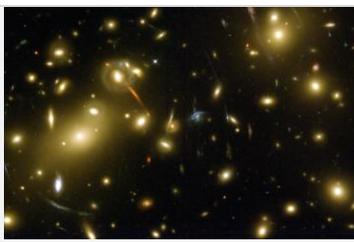
Uma vez que a separação entre as galáxias não é muito grande os encontros entre galáxias são comuns. As interações deformam as galáxias, gerando peculiaridades como caudas de maré e anéis.



Figura 24.11: NGC 4038/9: um exemplo clássico de galáxias em colisão (coloque o cursor na imagem da direita para seguir o link para a simulação).

#### Fusão de galáxias e canibalismo galáctico

Se as galáxias colidem com velocidade relativamente baixa, elas podem evitar a disrupção por maré. Os cálculos mostram que algumas partes das galáxias que colidem podem ser ejetadas, enquanto as massas principais se convertem em sistemas binários (ou múltiplos) com pequenas órbitas ao redor uma da outra. O sistema binário recentemente formado, encontra-se envolto em um envelope de estrelas e possivelmente matéria interestelar, e eventualmente pode se fundir formando uma única galáxia. Esse processo é especialmente provável nas colisões entre os membros mais massivos de um aglomerado de galáxias, que tendem a apresentar velocidades relativamente mais baixas. A fusão pode converter galáxias espirais em elípticas.



#### Fusões:

São interações entre duas galáxias de mesmo porte. A fusão de duas espirais pode gerar uma galáxia elíptica.

#### Canibalismo:

Interações entre galáxias de portes muito distintos, em que a maior acaba "engolindo" a menor.

#### Superaglomerados:

Aglomerados de aglomerados de galáxias, são as maiores estruturas do Universo.

O termo **fusão de galáxias** é usado em referência à interação entre galáxias de **tamanhos semelhantes**. Quando uma galáxia muito grande interage com outra muito **menor**, as forças de maré da galáxia maior podem ser tão fortes a ponto de destruir a estrutura da galáxia menor cujos pedaços serão então incorporados pela maior. Astrônomos chamam este processo de **canibalismo galáctico**.

Observações recentes mostram que **galáxias elípticas gigantes**, conhecidas como galáxias **cD**, têm propriedades peculiares, tais como: halos muito extensos (até 3 milhões de anos luz em diâmetro), núcleos múltiplos, e localização em centros de aglomerados. Essas propriedades sugerem que essas galáxias **se formaram por canibalismo galáctico**.

Muitas vezes, o encontro entre as galáxias não é forte o suficiente para resultar em fusão. Numa interação mais fraca, ambas as galáxias sobrevivem, mas o efeito de maré pode fazer surgirem caudas de matéria, em um ou em ambos os lados das duas galáxias. Muitas galáxias com aparências estranhas, que não se enquadram em nenhuma das categorias de Hubble, mostram evidências de interações recentes. Simulações por computador mostram que sua forma pode ser reproduzida por interação de maré, em colisões. Um resultado recente de simulações em computador é a possibilidade de que colisões possam transformar galáxias espirais em elípticas: a interação pode retirar gás, estrelas e poeira das duas galáxias, transformando-as em uma elíptica.

### Distâncias de galáxias e de aglomerados de galáxias - a Lei de Hubble



Figura 24.12: Vesto Melvin Slipher (1875-1969).

Em 1912 **Vesto Melvin Slipher** (1875-1969) estudou 41 galáxias e descobriu que a grande maioria apresentava deslocamento espectral para o vermelho (*redshift*) como se todas estivessem se afastando de nós. Slipher descobriu que quanto mais fraca a luminosidade da galáxia e, portanto, mais distante, maior era o deslocamento para o vermelho de seu espectro.

Entre 1923 e 1929 **Edwin Powell Hubble**, usando o então recém instalado telescópio de 2,5 m de diâmetro do Monte Wilson, na Califórnia, identificou estrelas variáveis cefeidas em várias "nebulosas" e determinou suas distâncias, demonstrando conclusivamente que tratavam-se de outras galáxias similares à Via Láctea.

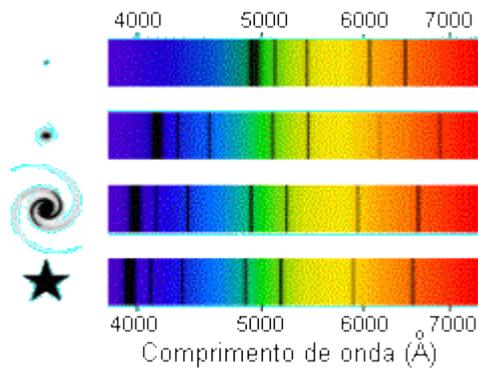
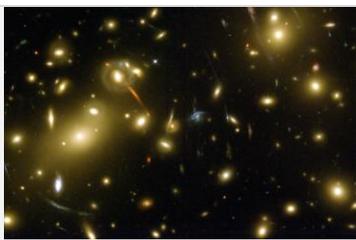


Figura 24.13: Diagrama representando espectros de quatro objetos a diferentes distâncias, que aumentam de baixo para cima. As linhas espectrais são as mesmas em todos os espectros, mas aparecem tão mais deslocadas para o vermelho quanto maior a distância.

**Desvios para vermelho (redshift)**

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{(\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}})}{\lambda_{\text{emitido}}}$$

A maioria das galáxias apresenta desvios para vermelho em seu espectro, o que indica que elas estão se afastando de nós (têm velocidade de recessão).

**Lei de Hubble:**

As velocidades de recessão das galáxias são diretamente proporcionais a suas distâncias até nós:

$$v = H_0 d$$

Hubble e seu colaborador, Milton Humason, também mediram os espectros das galáxias que estavam observando, confirmando que praticamente todas elas apresentavam um desvio espectral para o vermelho tanto maior quanto maior sua distância. Dando a interpretação usual para o desvio espectral, ou seja, admitindo que se deve a efeito Doppler, isso significa **que as galáxias estão se afastando de nós com velocidades tanto maiores quanto maiores suas distâncias**. Hubble e Humason mostraram seus resultados em 1929, por um gráfico da velocidade de recessão em função da distância, que é conhecido como Lei de Hubble, e é descrito pela expressão

$$V = H_0 d$$

onde  $v$  é a velocidade de recessão da galáxia, calculada a partir de seu *redshift*  $z$  ( $v = c \cdot z$ ; onde  $c$  é a velocidade da luz e  $z = \Delta\lambda/\lambda$ )  $d$  é a distância da galáxia até a Terra.

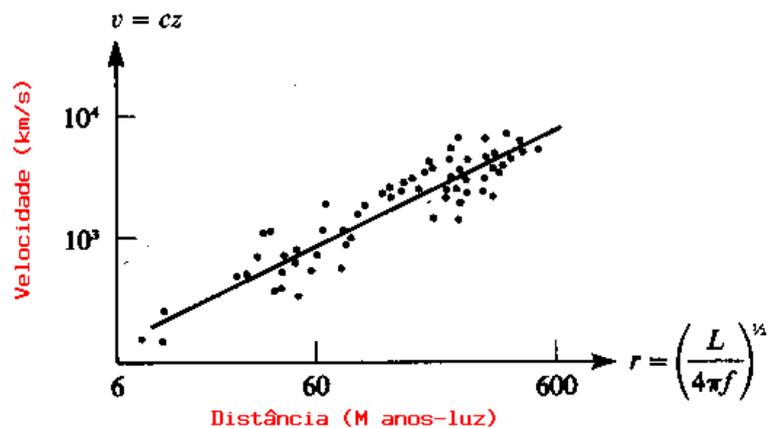
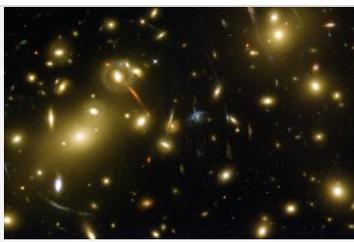


Figura 24.14: Velocidade de recessão das galáxias em função de sua distância à Terra. A linha reta mostra que as velocidades são proporcionais à distância. A declividade da reta dá o valor da constante de proporcionalidade, chamada constante de Hubble ( $H_0$ ).

O valor de  $H_0$  é representado em unidades de velocidade (km/s) dividido pela unidade de distância (milhões de anos-luz ou milhões de parsecs). Do gráfico (figura 24.10), obtemos um valor de  $H_0$  de  $(10^4 \text{ km/s}) / (600 \text{ Mal}) = 16 \text{ km/s/Mal} = 54 \text{ km/s/Mpc}$  (54 quilômetros por segundo por megaparsec).

Os astrônomos estão continuamente medindo o valor de  $H_0$  de diferentes maneiras, e seu valor ainda é motivo de discussão, mas atualmente o valor está convergindo para  $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$ . Esse valor significa que a velocidade de recessão das galáxias aumenta 71 km/s a cada megaparsec.



Uma aplicação muito importante da Lei de Hubble é na determinação de distâncias. Uma vez conhecida a constante  $H_0$ , podemos usar a Lei de Hubble para estimar a distância de um objeto remoto, a partir de seu *redshift*.

O procedimento é medir o *redshift*  $z = \Delta\lambda/\lambda$ , usar o efeito Doppler para calcular a velocidade de recessão ( $v = z.c$ ), e daí dividir pelo valor de  $H_0$  para calcular a distância. Em casos em que os *redshifts* são muito grandes (maiores do que 0,1), é necessário usar a fórmula do Efeito Doppler relativístico para calcular a velocidade de recessão:

$$v/c = [(1+z)^2 - 1] / [(1+z)^2 + 1]$$

Exemplo 1: O espectro de uma galáxia mostra a linha K do cálcio, cujo comprimento de onda de repouso é  $3\,934 \text{ \AA}$ , em  $3\,990 \text{ \AA}$ . Calcular a distância da galáxia usando  $H_0 = 71 \text{ km/s/Mpc}$ .

Solução:

$$z = (3990 - 3934) / 3934 = 0,014$$

$$v = 0,014 \times 3 \times 10^5 \text{ km/s} = 4200 \text{ km/s}$$

$$D = (4200 \text{ km/s}) / (71 \text{ km/s/Mpc}) = 59 \text{ Mpc}$$

Exemplo 2: Qual a velocidade de recessão de um quasar cujo *redshift* é  $z = 5$ ?

Solução:

$$v/c = [(1+5)^2 - 1] / [(1+5)^2 + 1] = 35/37 = 0,94 \rightarrow v = 0,94 c$$

A relação entre distância e velocidade constituiu a **primeira evidência para a expansão do Universo**, que estudaremos na Aula 28.

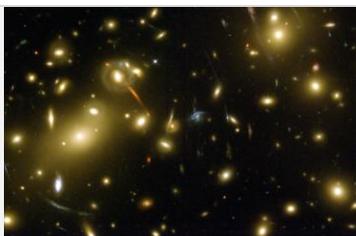
## Resumo

Galáxias tendem a se agrupar em aglomerados. A Via Láctea faz parte de um aglomerado pequeno chamado Grupo Local, com cerca de 50 galáxias, entre as quais Andrômeda e a própria Via Láctea são as duas maiores. O diâmetro maior do Grupo Local é 3 milhões de anos-luz, pouco mais do que a distância entre a Via Láctea e Andrômeda.

O aglomerado rico mais próximo do Grupo Local é o aglomerado de Virgem, que tem mais de 2.000 membros e atrai gravitacionalmente as galáxias do Grupo Local. O Grupo Local, o aglomerado de Virgem e outros aglomerados próximos constituem o Superaglomerado Local.

As massas observadas (pela radiação que emitem) dos aglomerados são insuficientes para manter as altas velocidades das galáxias que deles fazem parte, indicando que existe matéria escura também no meio entre as galáxias.

Encontros entre galáxias são comuns em aglomerados, pois as separações entre as galáxias não são muito grandes comparadas com seu tamanho (ao contrário das estrelas!). As interações deformam as galáxias, gerando peculiaridades como caudas de maré e anéis. Interações entre duas galáxias de mesmo porte são chamadas de fusões. Interações entre galáxias de tamanhos muito diferentes são chamadas de canibalismo, pois a maior acaba “engolindo” a menor.



Simulações mostram que a fusão de duas espirais pode gerar uma galáxia elíptica.

Galáxias elípticas gigantes, muitas com núcleos duplos ou múltiplos, são comumente encontradas em centros de aglomerados ricos. É provável que elas tenham crescido “engolindo” galáxias menores, um fenômeno chamado canibalismo galáctico.

Aglomerados de galáxias tendem a se aglomerar em superaglomerados, que constituem as maiores estruturas do universo. Em grande escala, o universo tem a estrutura de uma esponja, feita de filamentos – formados por grandes cadeias de superaglomerados –, e imensos vazios, com muito poucas galáxias.

A maioria das galáxias apresenta um desvio para o vermelho em seu espectro, que indica que elas estão se afastando de nós. As velocidades de afastamento são diretamente proporcionais às distâncias que as galáxias estão de nós. Essa relação linear entre as velocidades de recessão e as distâncias das galáxias é chamada Lei de Hubble, e é expressa pela relação  $v = H_0 d$ , onde  $H_0$  é a constante de Hubble,  $v$  é a velocidade de recessão da galáxia e  $d$ , a sua distância.

A Lei de Hubble permite determinar distâncias de galáxias remotas.

## Questões de fixação

1. a) O que é o Grupo Local de galáxias?  
b) Quantos membros ele contém, aproximadamente, e quais são os tipos de galáxias mais comuns nele?  
c) Quais são os seus dois membros mais importantes?
2. O que é o Superaglomerado Local?
3. Como é a estrutura em grande escala do universo? Pensando no Universo como um todo, como é a distribuição de galáxias nele?
4. Por que encontros entre estrelas são raros e entre galáxias não?
5. Como as interações influenciam a evolução das galáxias?
6. O que é a “Lei de Hubble” e como ela é usada para determinar a distância de galáxias?
7. Um aglomerado de galáxias tem velocidade radial de 60.000 km/s. A velocidade média das galáxias no aglomerado (medida pela dispersão de velocidades) é 300 km/s, e o raio do aglomerado é 1 Mpc. Adotando  $H = 100 \text{ km/s/Mpc}$ , encontre:
  - a) a distância do aglomerado;
  - b) a massa do aglomerado.

